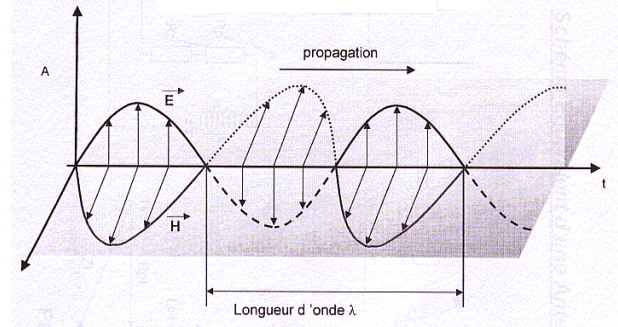


Chapitre 1 : modulations analogiques AM et FM.

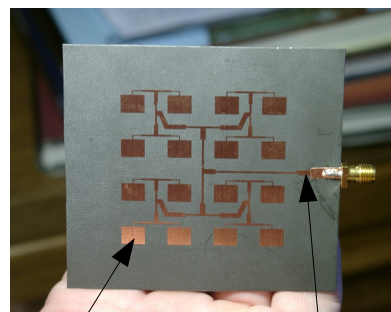
1) rappels généraux sur la modulation.

- Les signaux sont véhiculés dans l'air par une onde électromagnétique à la vitesse de la lumière  $c = 3.10^8$  m/s :

- Relation essentielle pour une onde électromagnétique :  $\lambda = \frac{c}{f}$

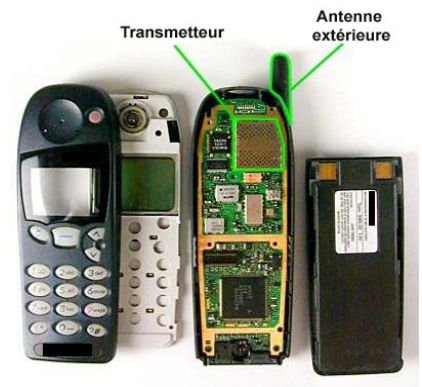


- Pour émettre les ondes électromagnétiques, on utilise des antennes :



antenne patch

ligne microruban  
(ou microstrip)



Transmetteur

Antenne extérieure

**Problème des antennes** : pour pouvoir transmettre une onde de fréquence  $f$ , il faut une antenne de longueur  $L$  telle que ...

Exemple : si on veut transmettre directement un signal de fréquence  $f = 1$  kHz de la bande audible (voix, musique) où  $20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ , il faut une antenne de dimension

$$L = \dots$$

Solution :

**MODULATION.**

Chaîne d'émission de l'onde :

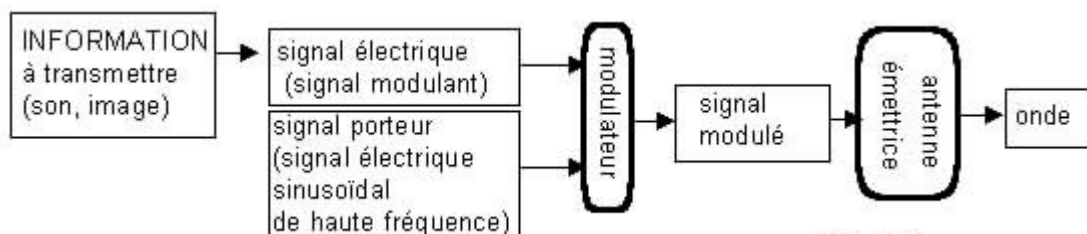
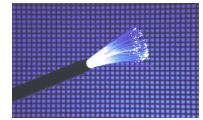
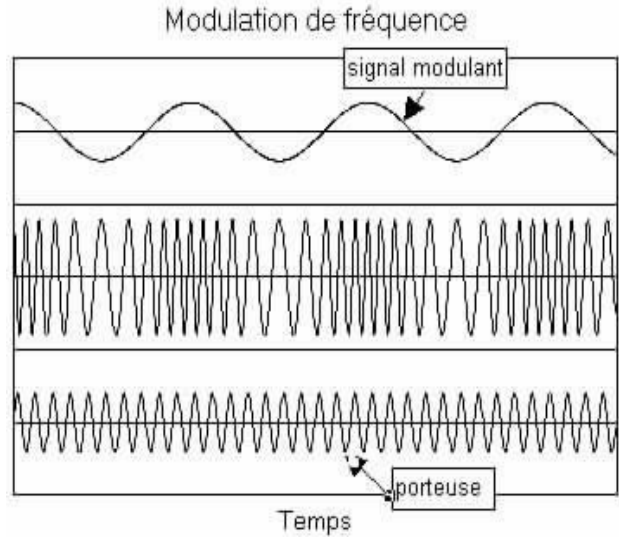
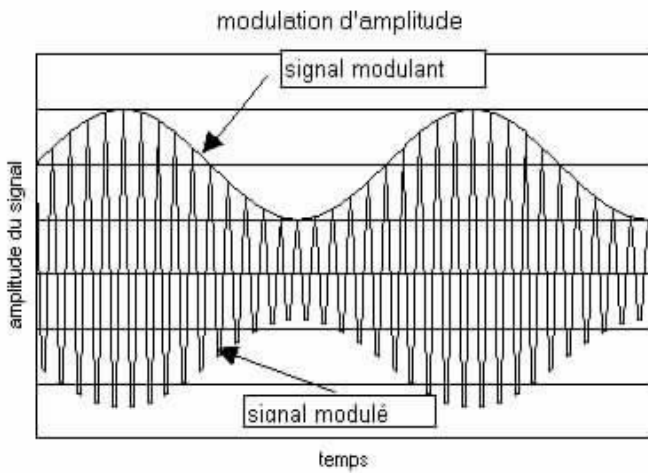


Figure 1

Le signal H.F est appelé PORTEUSE . Le signal B.F est appelé **SIGNAL MODULATEUR** ou **modulant** . Le signal envoyé est le signal modulé.

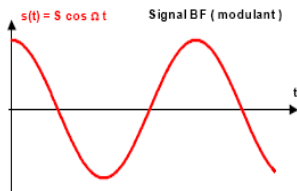


deux grands types de modulation analogique :



2) rappels sur la modulation d'amplitude.

● modulation d'amplitude avec transmission de la porteuse (MAPC) :

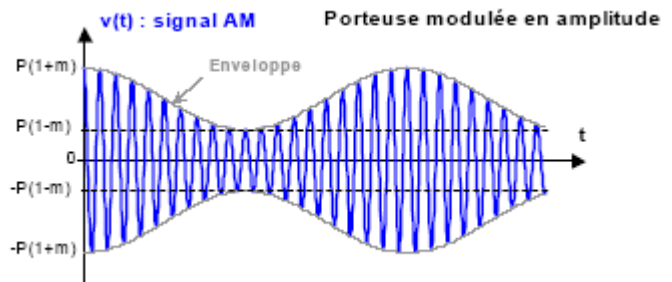
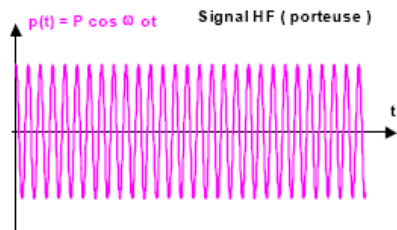


$s(t) = S \cos \Omega t$   
Signal modulant BF

Modulateur AM

$v(t) = p(t) + k s(t) p(t)$   
Signal AM

Porteuse HF  $p(t) = P \cos \omega t$

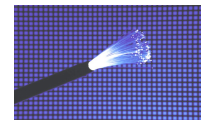


$$v(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t) \cdot (1 + k \cdot S \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))$$

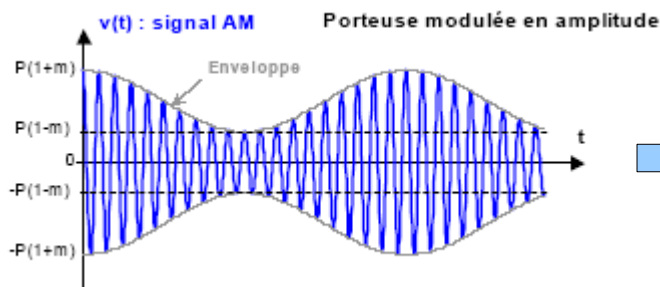
$$v(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t) \cdot (1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))$$

**m : indice de modulation.**

équation de l'enveloppe de v(t) :

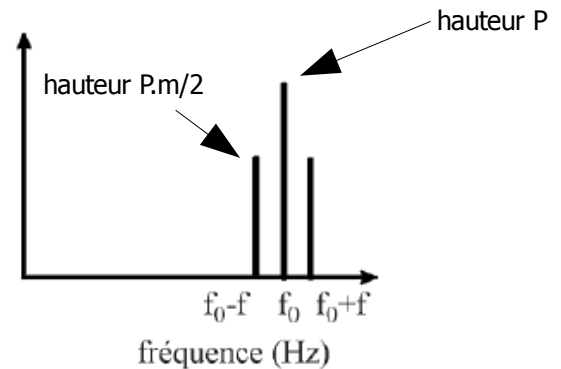


● spectre du signal modulé en amplitude :

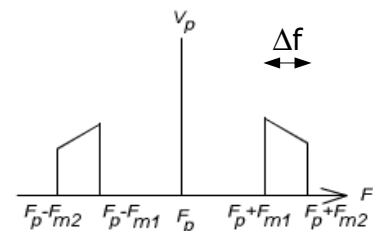


SIGNAL

$$v(t) = \hat{P} \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t) \cdot (1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))$$



SPECTRE



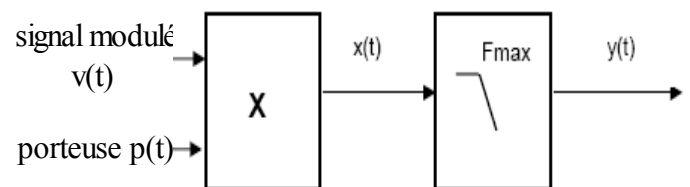
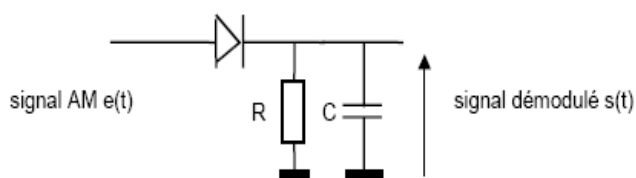
Spectre du signal AM si le signal modulant n'est pas sinusoïdal :

Remarques :

- la largeur de bande utilisée pour la modulation en amplitude à porteuse conservée est de  $B = 2 \cdot \Delta f$  où  $\Delta f$  est la largeur de bande du signal modulant. Par exemple, en radiodiffusion PO ou GO, chaque émetteur ne dispose légalement que de  $B = 9$  kHz. On limite donc le signal modulant à  $\Delta f = 4$  kHz, ce qui oblige à filtrer les aigus.
- Souvent, on ne transmet qu'une seule bande de fréquence sans transmettre la porteuse (MAPS ou BLU). La largeur de bande utilisée est de  $B = \Delta f$ .

● démodulation du signal modulé en amplitude :

On trouve deux montages types :



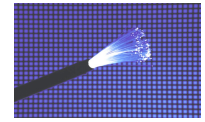
démodulation par détection synchrone :

démodulation par ...

Ce montage ne fonctionne pas pour  $m > 1$

principe de fonctionnement : voir exercice

<http://ebrois.free.fr/cours/electronique/am/am.htm>

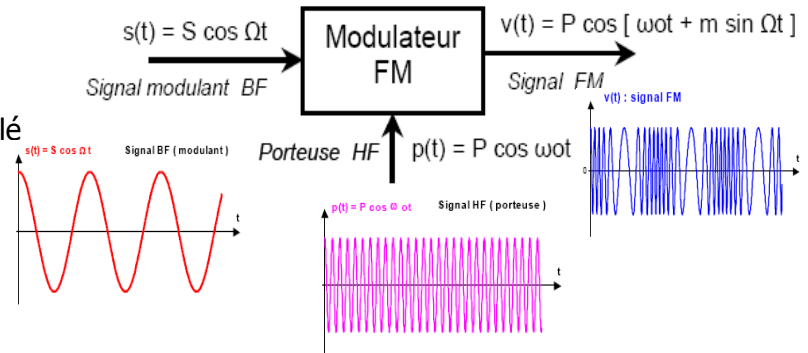


### 3) modulation de fréquence.

• signal dans le domaine temporel :

Dans le cas d'une modulation de fréquence, c'est la fréquence instantanée du signal modulé qui varie en fonction du signal modulant :

$$f(t) = f_0 + k_f \cdot s(t).$$



Dans le cas d'une modulation de phase, c'est la phase instantanée du signal modulé qui varie en fonction du signal modulant :  $\theta(t) = \theta_0 + k_\theta \cdot s(t)$ .

rappels des définitions de la pulsation, de la phase et de la fréquence :

Phase instantanée d'un signal :  $\theta(t)$  = tout ce qu'il y a à l'intérieur du cosinus (ou du sinus)

$$\text{Pulsation instantanée d'un signal : } \omega(t) = \frac{d \theta(t)}{dt} \quad \text{Fréquence instantanée : } f(t) = \frac{\omega(t)}{2 \cdot \pi}$$

$$\begin{aligned} \text{Application au signal sinusoïdal : } s(t) &= \hat{S} \cdot \cos(\Omega \cdot t + 1,3) \\ \theta(t) &= & \omega(t) &= & f(t) &= \end{aligned}$$

$$\text{Application au signal modulé FM : } v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t))$$

$$\theta(t) = \quad \omega(t) =$$

La fréquence instantanée du signal modulé est donc :  $f =$

Cette fréquence varie entre :

$$\text{On appelle **excursion en fréquence** du signal FM la grandeur } \Delta f = m \cdot F$$

Si le signal modulant n'est pas sinusoïdal, alors, la fréquence instantanée du signal modulé vaut :

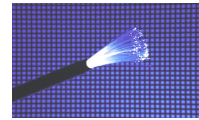
$$f(t) = f_0 + k_f \cdot s(t)$$

Cette fréquence varie entre  $f_0 - k_f \cdot \hat{S}$  et  $f_0 + k_f \cdot \hat{S}$ . On a donc  $\Delta f = k_f \cdot \hat{S}$  et  $m = \Delta f / F$  est **l'indice de modulation**.

En radiodiffusion FM, la valeur de  $\Delta f$  est fixée à  $\Delta f = 75$  kHz.

Exemples de  $\Delta f$  :

- ① Emission dans la bande CB :  $f_0 = 27$  MHz ;  $F \approx 4$  kHz et  $B = 10$  kHz ( $m \approx 0,25$ ).  
 $\Rightarrow$  Emission à faible excursion de fréquence ( $\Delta f \approx \pm 1$  kHz).
- ② Emission dans la bande FM :  $f_0 = 100$  MHz ;  $F \approx 20$  kHz et  $B \approx 200$  kHz ( $m \approx 4$ ).  
 $\Rightarrow$  Emission à excursion de fréquence moyenne ( $\Delta f \approx \pm 75$  kHz).
- ③ Emission satellite :  $f_0 = 10$  GHz ;  $F \approx 8$  MHz et  $B \approx 30$  MHz ( $m \approx 1$ ).  
 $\Rightarrow$  Emission à excursion de fréquence élevée ( $\Delta f \approx \pm 8$  MHz).

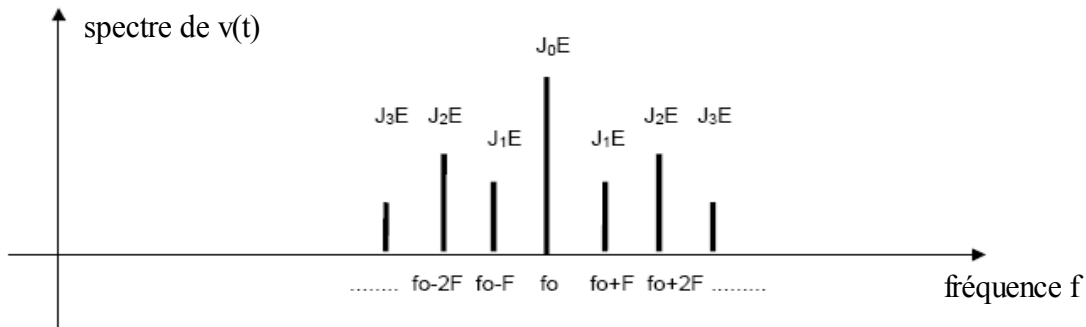


● spectre du signal FM :  $v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0.t + m.\sin(\Omega.t))$

Cette expression se développe à l'aide de fonctions mathématiques appelées fonctions de Bessel, de paramètre m :

$$v(t) = \hat{P} \cdot J_0(m) \cdot \cos(\omega_0.t + \varphi_0) + \hat{P} \cdot J_1(m) \cdot \cos((\omega_0 \pm \Omega).t + \varphi_1) + \hat{P} \cdot J_2(m) \cdot \cos((\omega_0 \pm 2.\Omega).t + \varphi_2) + \dots$$

$J_0(m)$ ,  $J_1(m)$  et  $J_2(m)$  sont les valeurs des fonctions de Bessel pour le paramètre m (valeurs données le plus souvent dans un tableau)



On constate donc que le spectre du signal modulé, de porteuse de fréquence  $f_0$  et de signal modulant de fréquence  $F$  :

- 
- 
- 

La bande de fréquence  $B$  occupée par le signal FM est donc :

- 
- 

**Règle de CARSON** : on considère que la bande  $B = 2.(\Delta f + F) = 2. (m+1).F$  contient 98% au moins de la puissance du signal FM.

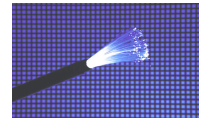
Application : si  $F = 10$  kHz et  $\Delta f = 75$  kHz,  $B = \dots$

Remarque : si le signal modulant n'est plus sinusoïdal de fréquence  $F$  mais a un spectre limité à la fréquence  $F_{max}$ , la formule de Carson s'applique avec  $F \rightarrow F_{max}$ .

Tableau des valeurs des fonctions de Bessel pour quelques valeurs de m :

m	$J_0$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$	$J_6$	$J_7$	$J_8$	$J_9$	$J_{10}$
0,00	1,00										
0,25	0,98	0,12									
0,5	0,94	0,24	0,03								
1,0	0,77	0,44	0,11	0,02							
1,5	0,51	0,56	0,23	0,06	0,01						
2,0	0,22	0,58	0,35	0,13	0,03						
2,5	-0,05	0,50	0,45	0,22	0,07	0,02					
3,0	-0,26	0,34	0,49	0,31	0,13	0,04	0,01				
4,0	-0,40	-0,07	0,36	0,43	0,28	0,13	0,05	0,02			
5,0	-0,18	-0,33	0,05	0,36	0,39	0,26	0,13	0,05	0,02		
6,0	0,15	-0,28	-0,24	0,11	0,36	0,36	0,25	0,13	0,06	0,02	
7,0	0,30	0,00	-0,30	-0,17	0,16	0,35	0,34	0,23	0,13	0,06	0,02
8,0	0,17	0,23	-0,11	-0,29	-0,10	0,19	0,34	0,32	0,22	0,13	0,06





● **synthèse du signal FM** :  $v(t)$  de fréquence variable :  $f(t) = f_0 + k_f \cdot s(t)$  où  $s(t)$  est le signal modulant.

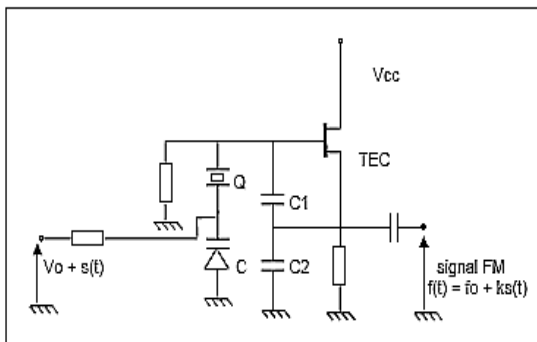
Les exigences d'un émetteur FM sont :

- la porteuse doit être de fréquence  $f_0$  le plus stable possible.
- l'excursion en fréquence  $k_f \cdot \hat{S}$  doit pouvoir varier entre quelques kHz et plusieurs MHz.

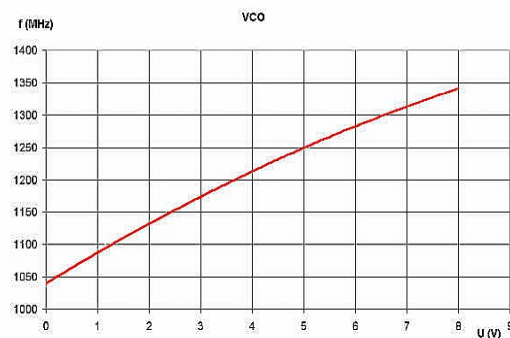
Synthèse directe par VCO : on doit créer un signal  $v(t)$  de fréquence variable :  $f(t) = f_0 + k_f \cdot s(t)$  avec  $f_0$  constant et  $k_f$  constant.

Un Voltage Controlled Oscillator (en français Oscillateur Contrôlé en Tension) est un montage qui donne un signal de sortie ... .. dont la ... .. varie avec le signal d'entrée  $s(t)$ .

Exemple de montage :



Exemple de caractéristique d'un VCO :



On a vu en première année qu'on pouvait créer un oscillateur sinusoïdal à l'aide d'un quartz, de deux condensateurs et d'un amplificateur TEC. La fréquence de l'oscillateur est réglée par le ... .. On fait varier légèrement la fréquence de l'oscillateur à l'aide d'une diode à capacité variable (Varicap) semblable à un condensateur dont la valeur de C dépend de la tension appliquée.

Problèmes de l'utilisation directe du VCO :

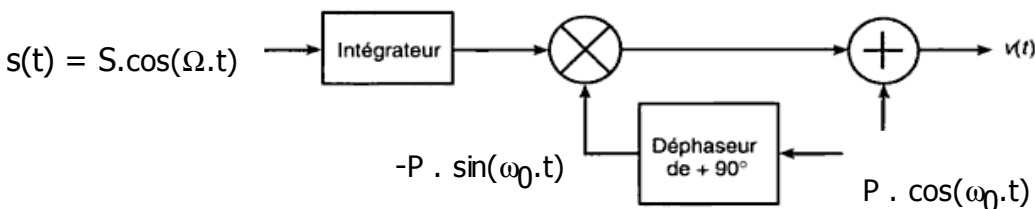
- 
- 

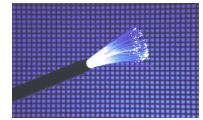
Synthèse indirecte par la méthode d'Armstrong dans le cas où m est faible :

On doit créer un signal de la forme :  $v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t))$

Si  $m \ll 1$ , on fait l'approximation au 1er ordre :  $\cos(m \cdot \sin(\Omega \cdot t)) \approx 1$  et  $\sin(m \cdot \sin(\Omega \cdot t)) \approx m \cdot \sin(\Omega \cdot t)$

d'où :  $v(t) \approx \hat{P} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - \hat{P} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \cdot m \cdot \sin(\Omega \cdot t)$  et la méthode de synthèse de  $v(t)$  :





Synthèse par boucle à verrouillage de phase (PLL) : voir annexe sur la PLL.

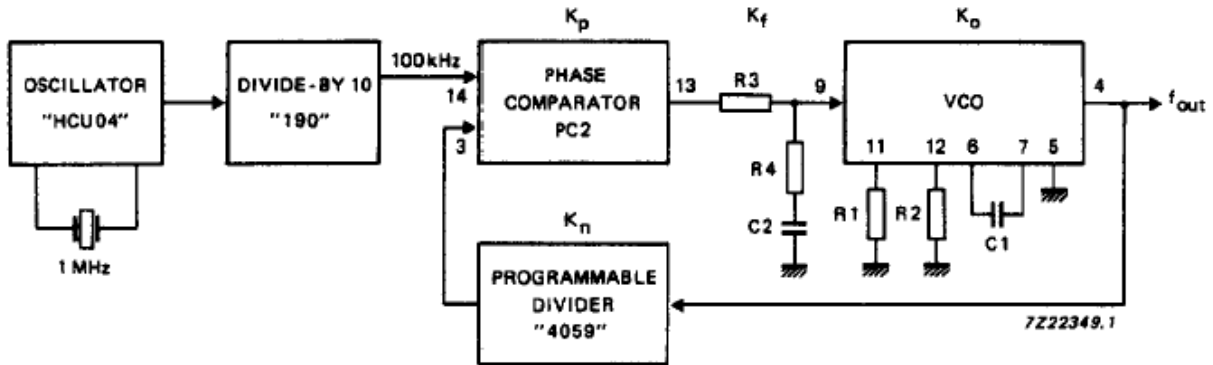
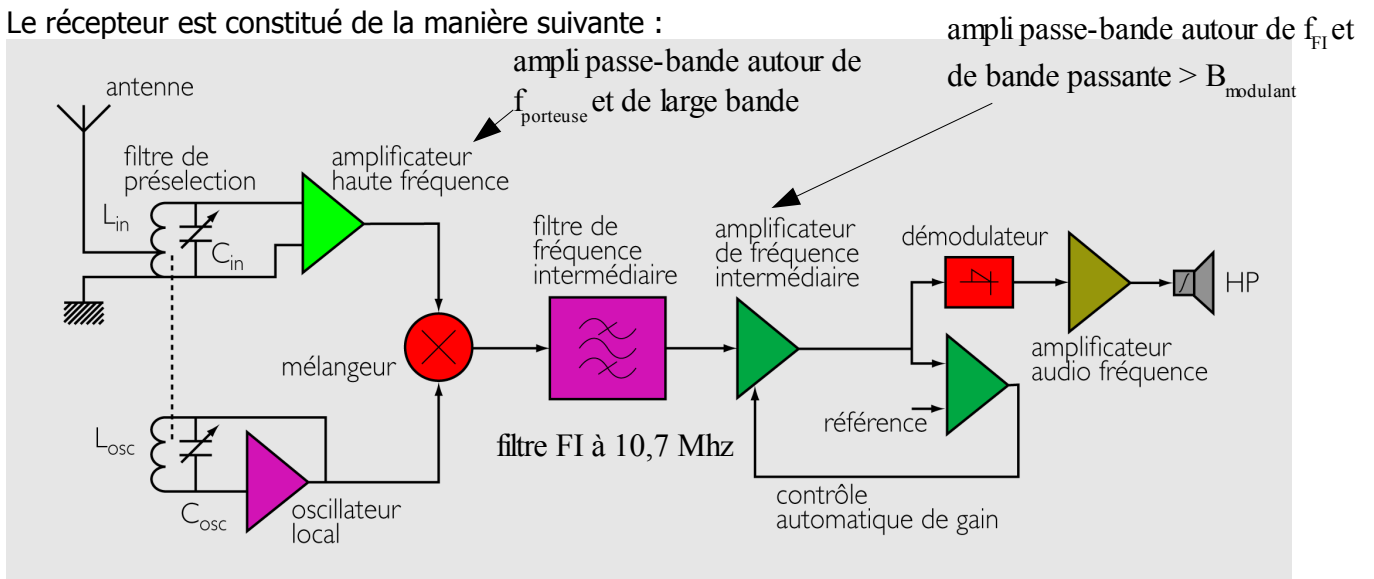


Fig.32 Frequency synthesizer.

● démodulations FM :

Le récepteur est constitué de la manière suivante :



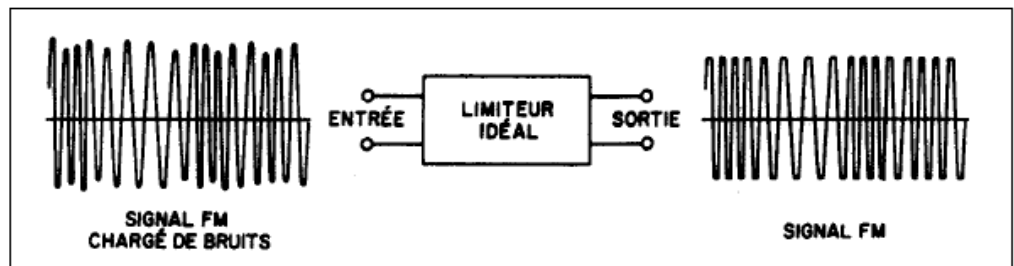
On choisit  $f_{osc}$  telle que :  $f_{FI} = f_{porteuse} + f_{osc}$  ou  $f_{osc} - f_{porteuse}$

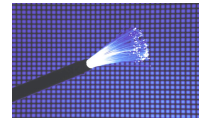
Attention à la fréquence image :  $f_{image} = f_{porteuse} + 2.f_{FI}$  dans le premier cas car :  $f_{image} - f_{porteuse} = f_{FI}$  !

On trouve également quelquefois un limiteur :

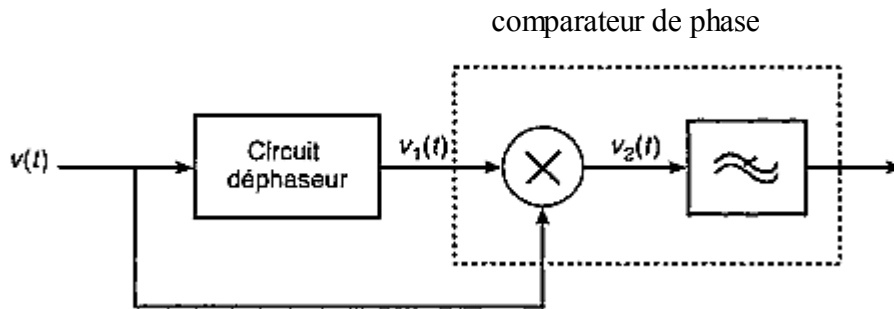
Rôles :

- .
- .





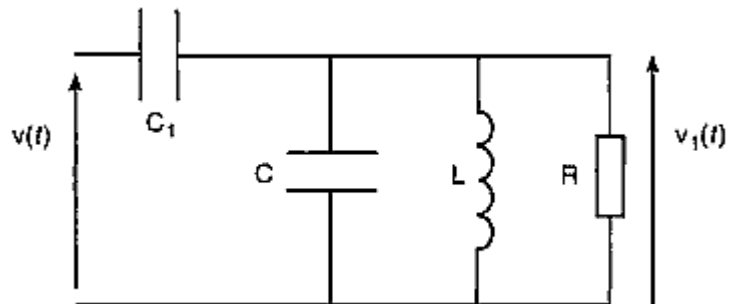
Démodulateur de fréquence à quadrature (ou à coïncidence):



Le circuit déphaseur est constitué de composants RLC :

Ce circuit sélectif passe-bande a une fréquence centrale :

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot (C + C_1)}} \text{ et un facteur}$$



de qualité souvent très supérieur à un dans la pratique.

De plus, on montre que le déphasage entre  $v_1(t)$  et  $v(t)$  est à peu près linéaire autour de  $f_0$  de

$$\text{telle sorte que : } \phi_{v_1/v} = \frac{\pi}{2} - K_\phi \cdot (f - f_0)$$

On s'arrange alors pour que la fréquence  $f_0$  « coïncide » avec la fréquence de la porteuse.

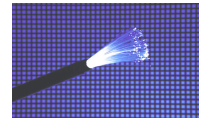
On a alors :  $v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t))$  et  $v_1(t) = v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t) + \Phi)$

Après le multiplieur :  $v_2(t) = K \cdot v(t) \cdot v_1(t) = K \cdot \hat{P}^2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t)) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + m \cdot \sin(\Omega \cdot t) + \Phi)$

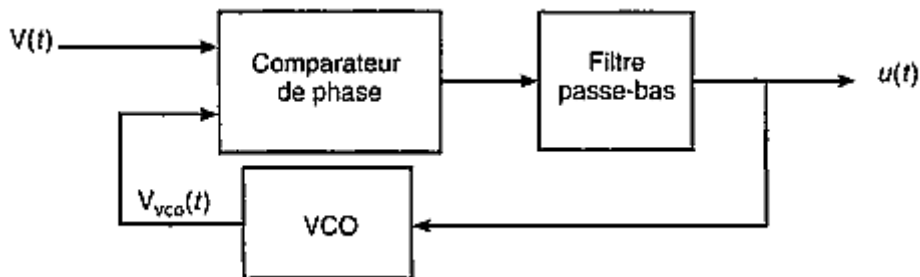
Après le filtre passe-bas :  $v_3(t) =$  = =

Ce type de démodulateur est très utilisé dans les circuits intégrés car le multiplieur est une structure très facile à intégrer.





Démodulateur de fréquence à PLL :



En régime permanent, la tension de commande du VCO n'est pas nulle (sinon,  $f_{VCO}=f_0$ ) et est proportionnelle à  $f - f_0$  c'est-à-dire proportionnelle au signal modulant. (voir annexe sur la PLL)

● puissance contenue dans le signal FM :

On a vu que le signal modulation de fréquence pouvait s'écrire :  $v(t) = \hat{P} \cdot \cos(\omega_0.t + m.\sin(\Omega.t))$  et que l'on peut développer cette expression à l'aide des fonctions de Bessel :

$$v(t) = \hat{P} \cdot J_0(m).\cos(\omega_0.t + \varphi_0) + \hat{P} \cdot J_1(m).\cos((\omega_0 \pm \Omega).t + \varphi_1) + \hat{P} \cdot J_2(m).\cos((\omega_0 \pm 2.\Omega).t + \varphi_2) + \dots$$

Aux bornes d'une résistance R, la puissance dissipée par ce signal est :

$\langle p(t) \rangle = \langle v(t)^2 \rangle / R =$  somme des puissances apportées par chaque raie. (car le signal  $v(t)$  a un spectre de raies).

Comme chaque raie est une sinusoïde et que la valeur moyenne d'une sinusoïde au carré est  $1/2$ ,

$$\langle p(t) \rangle = \frac{\hat{P}^2}{2.R} \cdot (J_0(m)^2 + 2.J_1(m)^2 + 2.J_2(m)^2 + \dots) \text{ avec } (J_0(m)^2 + 2.J_1(m)^2 + 2.J_2(m)^2 + \dots) = 1$$

d'où :  $\langle p(t) \rangle = \frac{\hat{P}^2}{2.R}$  et ne dépend pas du signal modulant : la puissance est celle que dissiperait la porteuse seule sans modulation. La puissance fournie par l'émetteur est constante.

● Exemples de modulations FM :

- les modems (**mod**ulateur-**dem**odulateur) bas débit utilisent la modulation de fréquence ;
- les téléphones analogiques utilisent la modulation de fréquence pour composer le numéro : chaque chiffre est codé par une combinaison de deux fréquences pour former un code DTMF. C'est une modulation FSK qui utilise plus de deux fréquences (MFSK, multiple frequency-shift keying) ;
- les radios de la «bande FM» émettent, comme leur nom l'indique, en modulation de fréquence sur la bande VHF II. (88 – 108 Mhz)

<http://ebrois.free.fr/cours/electronique/fm/fm.htm>